

嫌気性流動床における生物膜の動力学的解析

九州大学工学部 学生員○今井 剛
同 上 学生員 河村幸雄
同 上 正 員 楠田哲也

1. はじめに

付着生物膜型廃水処理においてその処理水質を予測する場合に、生物膜の動力学的特性を把握することが大変重要である。著者らはこれまでに生物膜の動力学的特性を表現できるモデルを構築し、そのモデルを用いて生物膜の剥離制御に関する予測シミュレーションを行ってきた。このモデルによるシミュレーション結果では、生物膜深部において蓄積が著しいのは死滅菌及び細胞外ポリマーであった。これは生物膜深部に基質がほとんど供給されないことから、活性菌の増殖に死滅がまされたためであると考えられる。このモデルによる定常状態の生物膜内における活性菌体の膜厚方向分布を模式的に示したものが図-1である。この図に示すように、大規模な生物膜の剥離が生じた場合には、ほとんどの活性菌が剥離してしまい、処理水質が極端に悪化することになる。さらに、膜内における活性菌の残存量が少ないために、処理水質がもとのレベルに回復するのにかなりの時間を要した。著者らの研究結果から、生物膜内部には基質の供給がないために休眠状態にある“休眠菌”の存在の可能性が示唆されている²⁾。そこで本研究では、この“休眠菌”をこれまでの生物膜モデルに導入することにより、より正確な処理水質の予測ができるモデルへと改良し、実験結果と比較することによりその妥当性を検討し、“休眠菌”の生物膜内における蓄積過程を推定した。

2. 生物膜モデルへの“休眠菌”の導入

ある点における生物膜の経時変化の集合は、生物膜の空間変化の集合に等しいと仮定することにより、生物膜の経時変化をその空間変化に置き換え、生物膜モデルを構築した¹⁾。さらに、これまでの生物膜モデルにおいては、不活性な固形有機物として死滅菌、細胞外ポリマーの2つを考慮してきたが、今回新たに“休眠菌”を導入した。

ここで“休眠菌”とは「基質の供給がないために一種の休眠状態にあり、基質の供給とともに活性化する菌」と定義する。

本モデルに関する仮定は以下に示す通りであり、各収支式を表-1に示す。

①分割された各層内の基質濃度は一定である。

②菌体増殖はMonod式で表現できる。

③菌体量は動力学的に求められる活性菌体量で表現できる。

④基質は酢酸(HAc)、プロピオン酸(HPr)、n-酪酸(n-HBu)、水素(H₂)の4種である。

⑤細胞外ポリマーは活性菌体の全てが生成し、その生成量は各活性菌体の増殖量に比例する。

⑥死滅菌体及び細胞外ポリマーはその存在量に比例して分解される。

⑦休眠菌体は基質の供給がなくなるとともに、活性菌体の存在量に対して一定比率で生成する。

生物膜の模式図およびその剥離形態を図-2に示す。図示したように、生物膜の剥離はその表面から一定割合で生じる表面剥離と仮定した。各層の生物膜厚の初期値を10[μm]、全体の合計膜厚の初期値を100[μm]と設定した。図に

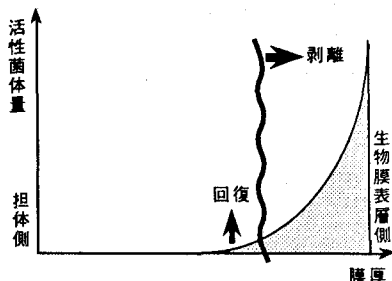


図-1 生物膜内の活性菌体分布の模式図(計算結果)

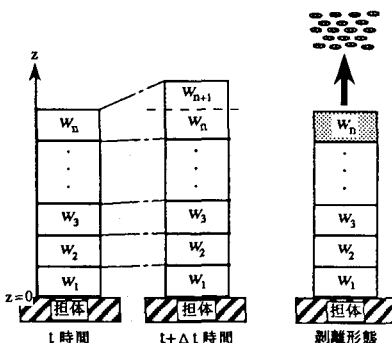


図-2 一次元生物膜モデル及び剥離形態模式図

表-1 一次元生物膜モデルの収支式

$$\frac{\partial S_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D \frac{\partial S_i}{\partial z} \right) + R, \quad R = -\frac{1}{Y_i} \frac{dX_{ai}}{dt} \quad \dots (1)$$

$$\frac{dX_{ai}}{dt} = \left(\mu_{mi} \cdot \frac{S_i}{K_{si} + S_i} - K_{di} - K_{gi} - K_{ei} \right) \cdot X_{ai} \quad \dots (2)$$

$$\frac{dX_{gi}}{dt} = K_{gi} \cdot X_{ai} - (K_{ei} + K_{di}') \cdot X_{gi} \quad \dots (3)$$

$$\frac{dX_{li}}{dt} = X_{ai} \cdot K_{di} + X_{gi} \cdot K_{di}' - (K_{ei} + K_{fi}) \cdot X_{li} \quad \dots (4)$$

$$\frac{dP_i}{dt} = \alpha_i \cdot \mu_{mi} \cdot \frac{S_i}{K_{si} + S_i} \cdot X_{ai} - (K_{ei} + K_{fi}) \cdot P_i \quad \dots (5)$$

$$i = A(\text{HAc}), P(\text{HPr}), B(\text{HBu}), H(\text{H}_2)$$

S: 基質、X_a: 活性菌体量、X_d: 死滅菌体量、X_g: 休眠菌体量、P: ポリマー、
t: 時間、z: 膜厚方向の厚さ、μ_m: 最大比増殖速度、K_s: 飽和定数、
K_d: 死滅係数、K_g: 休眠係数、K_e: 剥離係数、K_f: 分解定数、α: ポリマー生成率

示したように生物膜の生長により膜厚が初期値の2倍に達した場合にその層の分割を行ない、層の数を増加させた。

3. 結果と考察

計算時の初期値としては流動床の有効容積、流量、各基質の流入濃度には実験値を、動力学定数は本流動床を用いて推定した値を用いた。各菌体量の初期値は、各層において一定であると仮定した。今回新たに導入した休眠菌は基質の供給がなくなるとともに生成するという仮定から、シミュレーションにおいて基質濃度が5[mg-COD/l]以下になると生成すると仮定した。休眠状態の菌は一般に周囲の環境条件の悪化に対する耐性が活性菌に比べて高く、新陳代謝の速度も遅くなることから、休眠菌の死滅係数(Kd)は活性菌の半分であると仮定した。また休眠菌体の蓄積はおもに休眠係数とその死滅係数によって規定されるので、休眠係数はその死滅係数を考慮して0.01[1/day]と仮定した。シミュレーションにおける定常膜厚は実験結果から推定した値を用いて170[μm]と仮定した。計算結果と比較するために、本流動床を用いて測定した剥離部位別及び残留生物膜の比活性を表-2に示した。ここで比活性とは活性菌体量をVSSで除して無次元化したものである。図-3に計算結果である生物膜内の比活性の膜方向分布を示す。この図の左端が担体表面であり、右端が生物膜表層である。比較のために併記した剥離部位別及び残留生物膜の比活性の実測値は、剥離させたそれぞれの膜の厚さにおける比活性の平均値として表している。このシミュレーション結果は、生物膜が定常状態に達したと考えられる約1000時間経過後のものである。この図から活性菌体及び休眠菌体の比活性は生物膜表層から約50[μm]まで急激に減少し、約50[μm]から生物膜深層部にかけて緩やかに減少している。実測値と比較すると、生物膜表層付近において計算値は実測値よりもかなり大きくなっている。これは表層付近の生物膜を一括して剥離させて活性を測定したこと、その部位における比活性の平均値としてしか扱えず、おおまかな比較しか行なえなかったことによるものと考えられる。生物膜を細かく剥離させその活性を測定することにより、より正確な比較が可能であると考えられるが、生物膜内における比活性は実験結果からも表層付近が最も高くなる傾向を示していることから、ほぼ実測値の傾向を表現できていると考えられる。一方生物膜深層部において計算値は実測値よりも低くなっていることがわかる。これも生物膜をより細分化して活性を測定し、より正確な比較ができると考えられるが、生物膜深層ほどその比活性は低下すると推定されるので、ほぼ実測値の傾向を表現できていると推察される。図-4にこの計算結果の活性菌体量、休眠菌体量、死滅菌体量、細胞外ポリマーの構成比の膜方向分布を示した。この図から、休眠菌は生物膜表層付近にはほとんど存在せず、生物膜内層において蓄積の傾向がみられた。またその生物膜内における全存在量は活性菌体の全存在量の約1割であり、実験結果である休眠菌の推定量の活性菌体量に対する割合(1~2割)とおおよそ一致する。よって休眠係数として仮定した0.01[1/day]はほぼ妥当であると考えられる。

4. おわりに

本研究では"休眠菌"を生物膜モデルに導入し実測値と比較することにより、本モデルの妥当性を検討した。その結果、本モデルにより活性菌体及び休眠菌体の膜方向分布をほぼ表現できたと考えられる。休眠菌の蓄積に関しては、その休眠係数として仮定した0.01[1/day]はほぼ妥当であると考えられ、今後さらに詳細な検討が必要である。また今後生物膜を細かく剥離させその活性を測定し、より正確な比較を行なうことが必要であると考えられる。

[参考文献] 1) 土木学会第47回年次講演会概要集, II-385, pp.820-821, 1992.

2) 土木学会西部支部研究発表会, II, 1993.

3) Furumai, H., et al., Wat. Sci. Tech., Vol.23, Kyoto, pp1327-1336, 1991.

表-2 剥離部位別及び残留生物膜の比活性

Substrate	Sloughed and remain biomass			
	1st. sloughed	2nd. sloughed	3rd. sloughed	Remain
HAc	0.093	0.065	0.048	0.037
HPr	0.021	0.020	0.016	0.015
n-HBu	0.034	0.021	0.021	0.014
Total	0.148	0.106	0.085	0.066

[単位:—]

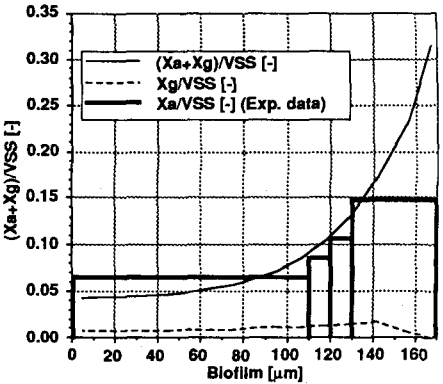


図-3 生物膜内比活性分布の計算値と実測値の比較

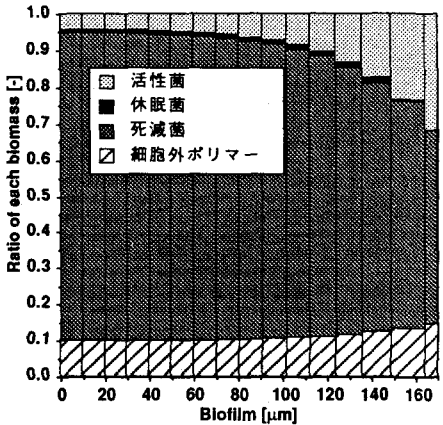


図-4 各菌体量の膜方向分布の計算結果